627
B416m

CURRY
AUG 5 '20

MONOGRAPHIE

DU

RÉGIME HYDRAULIQUE DE LA SEINE MARITIME

PAR

M. BELLEVILLE,

Ingénieur des Ponts et chaussées.

OBSERVATION ET ÉTUDE DU RÉGIME DES FLEUVES MARITIMES

La Seine.

Le régime de la partie maritime d'un fleuve participe à la fois du régime purement maritime à l'embouchure, et du régime purement fluvial d'amont.

L'étude de ce régime est donc, en général, plus complexe que lorsqu'il s'agit d'un port de côte ou d'un cours d'eau de l'intérieur.

Elle doit, naturellement, commencer par la connaissance des régimes extérieurs, qui ont une grande influence.

Du côté de la mer, il faut savoir de quelle manière se propagent les ondes de marée, quelles sont les directions et les intensités des courants auxquels elles donnent naissance.

p41225

Il faut savoir aussi quelle est la nature des fonds sous-marins et des côtes à l'ouvert de l'embouchure, car de cette nature dépend l'importance du cube de matières alluvionnaires que les marées peuvent transporter, soit en suspension dans l'eau, soit en roulant sur le fond, soit cheminant le long des côtes. Il faut aussi se rendre compte du régime des vents, dont l'action a une part d'influence sur le transport des matières.

Du côté d'amont, l'étude doit porter sur le débit du fleuve à ses divers états de crue, d'eaux moyennes ou d'étiage, ainsi que sur la quantité de matières que le fleuve est susceptible d'envoyer vers l'aval en suspension ou par cheminement au fond du lit.

Cela fait, on abordera l'étude du régime intermédiaire de la partie maritime du fleuve.

L'élément le plus essentiel est fourni par l'observation des courbes de marées, qui doivent être relevées en des stations nombreuses pendant de longues périodes, et correspondre aux divers états du fleuve, aux marées de différentes forces, et aux diverses conditions atmosphériques.

Les courbes de marée serviront à l'étude des variations locales des niveaux, des amplitudes totales, des pentes superficielles, des vitesses de propagation de la marée, des volumes d'eau introduits et évacués, des proportions de ces volumes fournis par l'amont et par l'aval, des débits aux diverses stations et des vitesses moyennes d'écoulement.

Des observations directes de vitesse, ainsi que des jaugeages, permettront de compléter et de contrôler les résultats précédents.

La connaissance de ces éléments ne présente pas seulement un intérêt théorique. Elle est indispensable à la navi-

gation, pour régler d'une manière rationnelle la marche des navires, leur faire franchir les points élevés à des heures et avec des tirants d'eau convenables, de les faire profiter des courants favorables, etc., en un mot, pour tirer le meilleur parti possible des conditions de navigabilité du fleuve.

Elle est indispensable aussi pour étudier les projets d'améliorations, pour exécuter les travaux, pour en apprécier les résultats.

Les débits, ou mieux les vitesses, constituent un facteur important de l'entretien des profondeurs, mais l'action des vitesses dépend aussi de la nature du fond. On aura recours, pour la connaître, à des dragages d'essai, à des forages, des prises d'échantillons. En outre, les résultats de l'action des eaux s'observent dans les variations des fonds. Il faut donc les reconnaître au moyen de relevés ou de reconnaissances hydrographiques, servant à dresser des cartes successives que l'on comparera entre elles.

Si l'on veut établir des ouvrages tels que des sas, des bassins à flot, etc...; si l'on veut escompter les dragages d'entretien de ces ouvrages, si l'on veut connaître la puissance de colmatage des eaux, il faudra rechercher le cube de matières alluvionnaires que les eaux peuvent transporter, et les observations doivent également porter sur ce point.

Enfin, et notamment pour certaines questions administratives, il est indispensable d'avoir quelques notions sur le degré variable de la salure des eaux.

Tel est, pensons-nous, le programme que l'on peut se proposer de remplir pour étudier le régime de la partie maritime d'un fleuve.

La Seine maritime se trouve dans des conditions qui ren-

dent ces études plus nécessaires peut-être encore que sur d'autres fleuves. Elle donne accès à Rouen, l'un des plus importants de nos ports intérieurs. Des intérêts considérables s'attachent à la conservation et à l'amélioration de ce port, et la présence à l'embouchure de la Seine des ports du Havre et de Honfleur oblige à s'entourer du plus grand nombre possible de documents pour la préparation des programmes d'amélioration de ce fleuve.

Depuis huit ans, nous sommes chargé de la navigation de la Seine en aval de Rouen jusqu'à la mer. Nous avons cherché à compléter les renseignements antérieurs relatifs aux marées et aux courants. Nous avons surtout cherché à dépouiller ces renseignements, à les coordonner, à en dégager les phénomènes par voie de moyennes, et à mettre les résultats sous une forme facilement lisible, en employant des procédés graphiques et schématiques.

La présente note, qui expose ces résultats, laissera de côté tout ce qui concerne la navigation, les travaux, etc., pour se borner à ce qui concerne exclusivement le régime du fleuve.

Même ainsi limitée, la question comporterait de très longs développements. Nous avons cherché à les restreindre en faisant, autant que possible, du texte, une sorte de légende de chaque figure.

L'ordre suivi dans cette note sera celui du programme d'études indiqué dans notre préambule.

Régime de la mer à l'embouchure de la Seine.

La propagation de la marée dans la Manche a été étudiée par le capitaine anglais Herwett, qui a dressé une carte de

courbes cotidales dans cette région. Les renseignements de cette carte sont complétés par les courbes de marée relevées le long des côtes.

Des observations simultanées ont été faites de Brest à Dunkerque, le 10 septembre 1885, sur la demande de M. l'Inspecteur général Partiot.

La planche I donne quelques-unes de ces courbes rapportées au zéro Bourdaloue, entre Cherbourg et Fécamp.

La planche II figure les courbes cotidales, tracées d'après la carte d'Herwett, pour la même marée du 10 septembre 1885.

Le *Pilote des côtes de France* fournit quelques renseignements isolés sur les courants dans cette région. Pour les abords immédiats du Havre, il existe des observations nombreuses, dues aux ingénieurs hydrographes et aux ingénieurs de ce port.

Nous avons cherché à avoir des renseignements complets pour toute la région à l'ouvert de l'estuaire de la Seine, et avons fait, de 1883 à 1885, de nombreuses observations de courants, qui, jointes aux documents antérieurs, nous ont servi à dresser des cartes indiquant la physionomie du mouvement des eaux.

Ces cartes, planches III et IV, sont établies d'heure en heure; elles embrassent la marée complète. La direction du courant est représentée par une ligne; son intensité correspond à l'épaisseur du trait. Le sens est indiqué par les flèches.

Les planches I, II, III, IV permettent à l'œil de suivre facilement le régime de la marée dans la Manche et les perturbations locales occasionnées par le golfe du Calvados et par l'estuaire de la Seine.

Dans cette partie de la Manche, le sens général du courant de flot est Est-Nord-Est, celui du jusant est Ouest-Sud-Ouest.

Le golfe du Calvados donne lieu à deux ondes dont l'interférence soutient la baissée de la mer qui suivrait le passage de la première à Carentan et à Port-en-Bessin, prolonge la durée de l'étale à Ouistreham, à Trouville et au Havre, et donne lieu à une double protubérance de la Seine.

Jusqu'à Cherbourg, la courbe de marée présente une forme normale qu'elle retrouve à peu près à partir de Fécamp.

L'heure de pleine mer est à peu près la même tout le long de la côte du Calvados et au Havre.

A l'entrée de l'estuaire, le premier flot se présente surtout du Nord-Ouest et le plein flot converge de manière à donner une résultante vers l'Ouest. Un peu avant pleine mer, le courant de flot persiste le long de la côte du Calvados, tandis que le dernier flot se renverse aux abords du Havre en commençant par la Hève (courant de Verhaule).

Après une sorte d'étale assez longue, le jusant s'établit en éventail, puis tend à tourner vers l'Ouest et le Sud-Ouest. Vers le Havre, le dernier jusant porte dans la même direction que le premier flot.

Nature des côtes et des fonds à l'embouchure de la Seine.

Nous ne pouvons donner ici une description détaillée de la constitution géologique, de la stratigraphie et des phénomènes contemporains aux abords de l'embouchure

de la Seine sans sortir du cadre étroit de cette note. Nous nous bornerons à un aperçu très sommaire.

La côte du Calvados est constituée par des marnes et des rochers calcaires, qui tantôt forment de petites falaises, tantôt sont garnis de dépôts sableux formant un cordon littoral ou des dunes. Entre le cap d'Antifer et le Havre existent des falaises, formées de bancs de craie, de silex, d'argile, de sables micacés.

Sous l'action des eaux d'infiltration venant des terres et du choc des lames de la mer, il se produit le long de ces côtes ou des éboulements assez fréquents, que la mer attaque promptement et transforme en galets, en sable, en vase.

Le fond est constitué par un sable plus ou moins vaseux, recouvrant sur des épaisseurs différentes, à l'entrée de l'estuaire, un banc d'argile kimméridienne. Des affleurements du sous-sol ancien forment les bancs du Ratier, d'Amfard, et les hauts-fonds de la petite rade du Havre.

Le banc sablonneux sous-marin qui se trouve ainsi à l'embouchure de la Seine s'étend à une assez grande distance au large et forme le banc de Seine.

On conçoit donc que sous l'action des courants, de la houle et des lames il se produise des transports importants de matière soit roulant sur le fond, soit cheminant le long des rivages, soit tenues en suspension. La Seine, en effet, débouche en mer dans une région très riche en matières susceptibles de se mouvoir.

Les vents ont une résultante tendant à activer l'introduction de ces matières dans le fleuve, d'une part à cause du gisement des côtes et de l'abri qu'elles forment contre les vents de la partie Est, d'autre part par la prédominance des vents de la partie Ouest dans ces parages.

Régime de la Seine fluviale.

La Seine fluviale, en avant de Martot où le barrage arrête le jeu des marées, déverse dans la Seine maritime un volume d'eau douce assez considérable. Ce volume varie nécessairement suivant que la Seine est en crue, en eaux moyennes ou en étiage.

Pendant la crue de 1882, on a trouvé un débit de 2483 mètres cubes, mais ce chiffre est exceptionnel et le débit n'a été que de 1425 mètres cubes pendant la crue du commencement de 1889.

Le débit d'étiage est assez difficile à établir. Les jaugeages donnent lieu à des anomalies par suite des manœuvres de barrages. Dans une discussion relative au projet de *Paris port de mer*, les ingénieurs de la troisième section de la Seine ont adopté 260 mètres cubes pour ce débit d'étiage.

La comparaison de dix années a donné les moyennes suivantes relativement à l'état de la rivière :

Barrages ouverts.	83 jours.
Eaux moyennes.	130 »
Eaux d'étiage	152 »

En comptant pour 800 mètres cubes le débit moyen pendant l'ouverture des barrages, pour 300 mètres cubes le débit d'étiage, dans le sens large du mot, et pour 500 mètres cubes le débit des eaux moyennes, le débit annuel total serait de 15,5 milliards de mètres cubes, correspondant à un débit moyen par seconde de 485 mètres cubes.

Régime de la Seine maritime.

Description sommaire. — La partie maritime de la Seine s'étend entre la mer et Martot, où le barrage limite le jeu des marées, sur un développement d'environ 150 kilomètres (Pl. V).

Le port de Rouen se trouve à peu près aux cinq sixièmes de cette longueur à partir de la mer.

Le fleuve est bordé de rives anciennes, plus ou moins défendues et rectifiées, entre Martot et la Mailleraye. De la Mailleraye à la Risle existent, tantôt sur les deux rives, tantôt sur une seulement, les digues de resserrement, construites de 1850 à 1867. Enfin, de la Risle à la mer, s'ouvre l'estuaire, à travers lequel les eaux se frayent une route variable dans les sables des bancs.

En amont de Rouen, la largeur du lit varie de 200 à 300 mètres. Dans la traversée de Rouen, elle s'abaisse jusqu'à 150 mètres; entre Rouen et la Mailleraye, la largeur est assez variable, et va de 200 mètres à 400 mètres. De la Mailleraye à Tancarville, elle croît assez régulièrement de 250 à 500 mètres; enfin, de Tancarville à la Risle, l'espacement des digues basses reste à peu près constant; mais le lit majeur passe de 500 mètres à 700 (Pl. VI).

Les profondeurs sont assez variables suivant les endroits. On se fera une idée de ces profondeurs en jetant les yeux sur la planche VII, où se trouve le profil en long *suivant le thalweg.*

Courbes de marées.

Les courbes de marées sont relevées au moyen de marégraphes enregistreurs ou de lectures sur des échelles.

Actuellement, on fait des relevés continus aux marégraphes de Rouen, de Caudebec, de Quillebeuf et du Havre, ainsi qu'aux échelles de Duclair, de la Risle et des bains d'Honfleur. Quand on veut, par intermittences, des observations plus rapprochées, on installe spécialement des échelles intermédiaires.

La forme des courbes de marée en Seine est très caractéristique, surtout en vives eaux (Pl. VIII). Nous avons choisi le 10 septembre 1885 pour donner la représentation de ces courbes, et permettre d'observer les transformations de la marée à l'extérieur, déjà figurées pour le même jour (Pl. I).

La forme diffère beaucoup suivant le coefficient.

La Planche VIII donne aussi les courbes de la morte-eau du 17 septembre 1885, et fait ressortir cette différence.

En vives eaux, la marée montante est accompagnée d'un phénomène généralement violent, le mascaret. On en a déjà parlé dans de nombreux ouvrages et nous n'en dirons rien ici. La violence du phénomène, au point de vue de son danger pour les navires et les rives, dépend plutôt de circonstances locales, mais les courbes de marée accusent une ascension brusque qui est générale.

Nous nous bornerons à l'étude de cette ascension brusque qui caractérise le régime de l'introduction du flot.

Dans une courbe de marée complète, l'échelle des abcisses est nécessairement trop petite pour que les varia-

tions de niveau soient dessinées avec détails. Nous avons fait observer le 30 mars 1888 d'abord l'amplitude de l'ascension immédiate, puis les niveaux de l'eau pendant 15 minutes après, à intervalles de temps très rapprochés.

La Planche IX donne les courbes pour plusieurs stations, et ces courbes sont placées sur une sorte de canevas obtenu en portant en abscisses les temps et en ordonnées les distances. Le point d'origine de chacune de ces courbes correspond à l'arrivée du flot, de sorte que la ligne qui joint ces points représente la vitesse de propagation du flot, à laquelle nous reviendrons plus loin.

A la Risle, la montée est rapide, quoique non immédiate, mais à mesure qu'on remonte la Seine, l'ascension brusque se caractérise. A Quillebeuf, elle est suivie aussitôt d'un mouvement de montée de l'eau; en amont de Quillebeuf, les courbes accusent le passage d'une première onde plus élevée, après laquelle la montée reprend plus ou moins rapidement par oscillations successives. La hauteur relative de cette première onde atteint 1 m. 70 à Villequier.

L'ascension brusque dont l'amplitude est maxima vers Villequier (3 m. 40) s'observe jusqu'à Rouen, mais à partir de Duclair, elle s'atténue beaucoup, de telle sorte qu'à Rouen, elle est peu accusée.

En vives eaux, la mer monte d'abord jusqu'à un premier maximum, puis la courbe s'abaisse, passe par un minimum, remonte à un second maximum, après lequel elle redescend jusqu'à basse mer.

Dans les stations d'aval, le premier maximum est plus élevé que le second, puis, à mesure qu'on va vers l'amont, la différence de niveau des deux protubérances diminue.

Vers la Roche, les deux protubérances atteignent le même niveau, et si on dépasse ce point, le second maximum est plus élevé que le premier.

L'intervalle de temps qui s'écoule entre les deux maxima, bien qu'un peu plus faible à Rouen, est à peu près constant et égal à deux heures et demie.

Le premier maximum a lieu, également d'une manière à peu près constante, une heure vingt minutes après le passage du flot.

En mortes-eaux, la courbe est assez régulière, la montée est moins rapide et on n'observe qu'un maximum.

Si on se reporte à la Planche I, qui donne les courbes de la même marée au dehors de l'estuaire, on voit que les deux ondes dont l'interférence se manifesterait le long de la côte du Calvados, se retrouvent dans la Seine et y donnent lieu à des phénomènes encore plus caractéristiques.

Ces particularités des courbes de marée de vives eaux n'ont pas existé toujours au même degré. Si l'on se reporte à l'époque où les digues n'étaient pas encore exécutées, on observe des différences notables. En 1850, la double protubérance n'existait pas, les courbes présentaient simplement une sorte d'aplatissement du sommet, et ce n'est que tout à fait à l'aval que la double protubérance tendait à se montrer (Pl. X).

Nous avons cherché une explication du phénomène, tant ancien qu'actuel; de l'interférence variable des deux ondes à l'embouchure peuvent sortir les formes de 1850 et les formes actuelles.

Le profil en long d'une onde qui se propage librement affecte la forme sinusoïdale ABC (Pl. XI, fig. 1). Si la propagation se trouve entravée, le profil en long prendra les

formes AB'C, AB''C. En outre, si l'entrave est continue, l'onde s'amortira peu à peu, et sa hauteur diminuera.

Les courbes locales de marée produites par le passage des ondes ABC, AB'C, AB''C auront les formes *abc*, *ab'c*, *ab''c* (Fig. 2).

Supposons maintenant que l'onde rencontre un barrage MN (Fig. 3), la montée produite par l'onde ABC ne se manifestera au delà du barrage que lorsque le niveau MP sera atteint, et la courbe locale affectera la forme *adbec* (Fig. 4).

Mais s'il y a de l'eau au delà du barrage, cette eau, qui ira à la mer rapidement tant qu'elle sera à un niveau notablement supérieur à MP, devra ensuite former au-dessus du barrage une lame déversante dont l'épaisseur diminuera lentement, de sorte que la courbe locale prendra la forme *a'd'b'e'c'*. Si on abaisse le niveau PM du barrage, les parties horizontales *ce*, *da*, ou plutôt les parties très peu inclinées *c'e'*, *d'a'*, diminueront d'importance et deviendront $c_{\prime}e_{\prime}$, $d_{\prime}a_{\prime}$.

En 1850, les seuils de la basse Seine étaient très élevés. Aujourd'hui, ils sont considérablement abaissés. La forme *c'e'b'd'a'* serait devenue $c_{\prime}e_{\prime}b_{\prime}d_{\prime}a_{\prime}$.

Au contraire, en 1850, la Seine présentant un large lit majeur, l'onde était moins étranglée qu'aujourd'hui, et cette onde donnerait la courbe locale *cb''a* au lieu de *cb'a*.

Considérons maintenant les deux ondes de la marée en Seine. La seconde, se propageant après la montée produite par la première, éprouve beaucoup moins d'obstacles. Elle doit donner lieu à une courbe plus symétrique et dont la forme a dû moins changer de 1850 à l'époque actuelle. Supposons qu'elle soit restée la même.

Soit (Fig. 5) CD la courbe locale correspondant à la pre-

mière onde de 1850, C'D' la même pour l'état actuel, et AB la courbe locale correspondant à la deuxième onde pour les deux époques, l'écart *d* est supérieur à l'écart *d'*, eu égard à l'avance notable observée dans l'arrivée du flot depuis l'exécution des digues. L'addition des ordonnées des courbes AB à celles des courbes CD et C'D' donne deux courbes EF et E'F' qui sont précisément de même forme que les courbes observées en 1850 et aujourd'hui à Villequier.

Aux stations plus en aval, la première onde ayant toute sa force, la courbe C'D' a son sommet plus élevé, ce qui accentue le premier maximum par rapport au second. Aux stations d'amont, au contraire, la première onde s'amortit plus que la seconde, et le maximum sur la courbe E'F' se montre à la deuxième protubérance.

Vitesse de propagation du flot.

Les courbes de marées donnent à chaque station l'heure du flot, et de la distance des stations on déduit la vitesse de propagation du flot entre chaque station.

Le flot met habituellement quatre heures pour aller de la Risle à Rouen (104 kilomètres); sa vitesse moyenne est donc de 26 kilomètres à l'heure ou 7 m. 20 par seconde. Cette vitesse n'est pas uniforme. Elle n'est, en moyenne, que de 5 m. 30 entre la Risle et Quillebeuf, pour atteindre une moyenne de 7 m. 50 entre Quillebeuf et Rouen.

Entre l'heure de basse mer au Havre et l'arrivée du flot à la Risle, il s'écoule de $2^h30'$ à $2^h50'$. La distance étant d'environ 25 kilomètres, la vitesse moyenne est de 2 m. 40 à 2 m. 70 seulement.

En portant en abscisses les temps, en ordonnées les distances, on aura une représentation graphique de la propagation du flot. Comme une marée isolée, par suite de la direction et de la force du vent, de la hauteur barométrique, du débit fluvial, etc., il est préférable de prendre la moyenne d'un grand nombre de marées du même âge de la lune.

La Planche XII donne le graphique de la propagation pour les marées du deuxième jour de la syzygie en 1884. On y a ajouté les mêmes renseignements pour 1849, époque où commençaient les travaux d'endiguement de la Seine, et 1866, époque où ils se terminaient.

Pour étudier les variations de la propagation, il faudrait porter sur le même tableau les moyennes de beaucoup d'années intermédiaires. Les lignes s'entre-croiseraient alors, et rendraient la lecture impossible. Nous avons représenté ces variations par un autre procédé.

En portant pour chaque station, la Risle, par exemple, les retards de l'heure de flot en cette station sur l'heure de basse mer au Havre en abscisses et les années en ordonnées, on suivra facilement les variations en cette station (Pl. XIV).

A partir de Villequier jusqu'à Rouen, les courbes sont à peu près parallèles, la vitesse de propagation est sensiblement constante et l'heure du flot à Rouen ne dépend guère que de l'heure du flot à Villequier.

Pour chaque station le graphique montre l'effet des travaux d'endiguement de la Seine (1849-1867).

L'heure du flot a avancé d'environ une heure à Villequier. Cette avance décroît quand on va vers l'aval, elle n'est plus, en moyenne, que de 20 minutes à la Risle.

Cet effet est très marqué et ne se confond pas avec les oscillations annuelles qu'on observe alors après l'achèvement des digues.

Les années 1875 et 1880 donnent lieu à un retard bien moindre de l'heure de basse mer au Havre que les années 1878 et 1888.

Ces différences sont dues à l'état de l'estuaire, dans lequel la marée se propage facilement quand le chenal est dégagé, direct et profond, et difficilement quand le chenal est sinueux, étroit et encombré. Dans ce dernier cas, l'eau baisse moins dans les stations d'aval, la vitesse du dernier jusant est plus faible, ce qui explique que le retard s'atténue un peu entre la Risle et Villequier, comme le montrent les graphiques.

La vitesse de propagation du flot est bien supérieure à celle du courant de flot. Le flot se propage comme une onde, et si cette hypothèse est exacte, la formule des ondes serait applicable.

Cette formule est la suivante :

$$V = \sqrt{g(H + h)} - U,$$

dans laquelle on a :

V vitesse de propagation de l'onde;

H profondeur d'eau à basse mer;

h hauteur de l'onde;

U vitesse du courant de jusant.

On a aussi :

$$T = \frac{E}{V}.$$

T, temps employé à parcourir une section.

E, longueur de cette section.

Cette formule se vérifie assez bien pour toute la Seine, mais l'étendue est trop grande pour faire des observations suffisamment rapprochées et obtenir par suite une précision suffisante.

Nous avons fait, du 20 au 29 octobre 1888, des observations sur une longueur plus faible, 21 500 mètres entre le kilomètre 316 (près Villequier) et le kilomètre 337,5 (Tancarville). Il y avait quinze stations espacées de 1000 à 2000 mètres seulement.

Au moyen de profils en travers nombreux, on a obtenu la section à basse mer, et en divisant cette section par la largeur on a eu la profondeur moyenne.

Nous avons appliqué les formules ci-dessus aux distances partielles pour lesquelles la profondeur moyenne pouvait être considérée comme constante.

Enfin nous avons pris pour valeur de h celle de l'ascension brusque au moment du passage du flot.

Les tableaux ci-contre donnent le résultat du calcul pour la marée du 22 octobre 1888, de coefficient 86. Pour cette marée, entre Tancarville et Villequier, on avait $h = 2$. On verra plus loin comment ont été établies les valeurs de U.

E	H	U	V	T
2 500^{m}	3^{m},10	1^{m},30	5^{m},78	402″
1 500	2^{m},50	1^{m},30	5^{m},20	288
2 000	3^{m},20	1^{m},30	5^{m},85	342
4 500	2^{m},90	1^{m},20	5^{m},73	785
1 500	4^{m},00	1^{m},20	6^{m},48	232
2 500	3^{m},60	1^{m},10	6^{m},31	296
2 000	3^{m},30	1^{m},10	6^{m}.10	328
1 500	4^{m},70	1^{m},00	7^{m},11	211
3 500	5^{m},20	1^{m},00	7^{m},40	473
$\Sigma E = 21\,500^{m}$				$\Sigma T = 57'37''$

**

On a fait de même pour la marée du 29 octobre, coefficient 57. On avait alors $h = 0$, et on a trouvé $\Sigma T = 1^h 5' 7''$.

L'observation directe, le 22 octobre, avait donné 57′15″. Il y a concordance parfaite. Cette concordance subsiste encore assez bien aux points intermédiaires, comme le fait voir la Planche XIII, qui figure la vitesse observée d'après les lectures en chaque station et la vitesse calculée. En mortes-eaux, la durée de l'étale de basse mer ne permet pas de faire avec précision des observations directes, mais on verra plus loin par un autre procédé que la formule se vérifie encore assez bien.

Lieux géométriques des hautes et basses mers.

En portant en abscisses les distances, en ordonnées les hauteurs, on aura le lieu géométrique des hautes et des basses mers. Comme on l'a déjà dit, il convient de prendre la moyenne de nombreuses observations, et c'est ainsi que nous avons dressé les lieux géométriques des coefficients 100, 70 et 40 (Pl. VII).

Le graphique donne en outre le lieu géométrique des plus hautes et des plus basses mers.

Le niveau de haute mer est toujours à peu près le même à Rouen qu'au Havre, quand, bien entendu, la Seine n'est pas en crue, mais dans l'intervalle, le lieu géométrique est loin d'être une droite horizontale.

On observe, surtout en vives eaux, une protubérance ayant son sommet vers Aizier, suivie d'une dépression ayant son sommet vers Duclair. Cela s'explique facilement. A l'aval, la haute mer correspond au passage de la première onde de la marée. qui s'exhausse par suite des résistances

à son introduction. Cette onde s'affaiblit alors, et il se produit la dépression qui ne cesse que lorsque le maximum dû à la deuxième onde devient plus élevé que le premier.

Il est à noter que la pleine mer, en se propageant, n'atteint pas successivement tous les points du lieu géométrique sans rupture de continuité dans le temps. Au point où le lieu géométrique du premier maximum couperait celui du second, il y a arrêt d'environ 2^h 1/2.

Le lieu géométrique des basses mers offre plusieurs particularités.

De Rouen à Caudebec, surtout en mortes eaux, la pente est faible. Elle devient forte de Caudebec à la Risle, et considérable dans l'estuaire.

En amont, les marées de mortes eaux baissent plus que celles de vives eaux. Les lieux géométriques se coupent vers Aizier, où le niveau de basse mer reste à peu près indépendant du coefficient de la marée.

En vives eaux, en effet, le cube d'eau considérable introduit par la marée n'a pas le temps de s'écouler avant le flot suivant aussi facilement que le cube plus faible introduit dans une marée de mortes eaux.

Amplitude de la marée.

L'amplitude de la marée est égale à la différence du niveau des lieux géométriques en chaque point. Elle décroît à mesure que l'on va vers l'amont. Si l'on représente par 100 l'amplitude de la marée au Havre, on aura en général les nombres suivants aux diverses stations de la Seine :

Le Havre.	La Risle.	Quillebeuf.	Villequier.	La Meilleraye.	Duclair.	Rouen.
100	80	70	50	40	35	30

Variations des niveaux de haute et basse mer.

Si l'on construit les lieux géométriques moyens pour plusieurs années successives, on observe des variations, faibles pour les hautes mers, importantes pour les basses mers.

Le niveau des hautes mers, abstraction faite de l'effet des crues, paraît être influencé seulement par la force et la direction du vent.

Le niveau des basses mers, au contraire, dépend beaucoup des facilités de l'écoulement de l'eau vers l'aval.

Ces facilités ont été augmentées d'une manière très importante par les travaux d'endiguement de la Seine, et il est résulté de ces travaux un abaissement considérable du lieu géométrique des basses mers qui s'est manifesté successivement jusqu'en 1866, surtout aux stations d'aval (Pl. XV). Mais après 1866 on observe encore des variations. On suivra ces variations en calculant les cotes moyennes pour les années successives, et en traçant les lieux géométriques, mais comme les lignes s'entre-croiseraient et ne seraient pas lisibles, il est préférable de faire pour chaque station un graphique spécial des oscillations.

La Planche XVI donne à titre de spécimen ce graphique pour la station de Quillebeuf. Il montre qu'aux années d'encombrement de l'estuaire, telles que 1878 et 1887, le niveau baisse notablement moins qu'aux années où l'estuaire est dégagé comme en 1875 et 1880.

Si, au lieu de prendre les moyennes annuelles, on prend des marées consécutives, on suivra l'influence du débit propre de la Seine.

La Planche XVII montre, aux stations de Quillebeuf, Cau-

debec et Duclair, les variations du niveau des deux plus basses marées de vives eaux pendant chaque mois de 1886.

L'influence des crues pendant les mois d'hiver est très marquée à l'amont, cette influence s'atténue à mesure qu'on va vers l'aval.

Profils instantanés.

Si, portant en abscisses les distances, on porte en ordonnées les hauteurs d'eau relevées à la même heure sur les courbes de marées, on aura un profil en long instantané de la surface de l'eau à cette heure.

Les profils instantanés permettent de reconnaître facilement les pentes de l'eau à chaque instant de la marée et en une station quelconque.

Ils ont surtout pour utilité de servir de point de départ à l'étude des débits et des vitesses moyennes.

En prenant des stations suffisamment rapprochées, la ligne figurant le profil instantané pourra être remplacée par une ligne polygonale formée d'éléments droits.

Cubages.

Si l'on considère deux stations A et B, les profils instantanés aux heures t et t' seront figurés par les droites AB et A'B', la surface ABA'B' est la projection de la variation, pendant le temps $t' - t$, du volume d'eau compris entre les stations A et B, et si L est la largeur moyenne de la section AB dont la longueur est D, ce volume sera égal à

$$\frac{AA' + BB'}{2} \times D \times L.$$

Nous l'appellerons le débit local pendant le temps $t' - t$, et en le divisant par $t' - t$, nous aurons le débit local par unité de temps (Pl. XIX, fig. 1). Portant en abscisses les temps, et en ordonnées positives ou négatives les débits locaux par unité de temps, pour une marée complète, nous aurons une série de rectangles dont les surfaces représenteront le débit local total.

Enfin, si on remplace cette série de rectangles par une aire curviligne de surface égale, le débit local par unité de temps sera mesuré à chaque instant par l'ordonnée correspondante de la courbe (Pl. XIX, fig. 2).

Le débit local pour une certaine étendue s'obtiendra en ajoutant algébriquement les ordonnées des courbes de débits locaux de toutes les sections comprises dans cette étendue.

Si l'on va ainsi jusqu'au point où cesse le jeu des marées, la courbe de la dernière station représentera le débit en eaux douces de la rivière.

Ce débit pouvant être considéré comme constant pendant la durée d'une marée, la courbe sera réduite à une droite.

Autrement dit, il suffira de diminuer les ordonnées de flot et d'augmenter celles de jusant d'une longueur représentant ce débit, ou encore de déplacer la ligne d'abscisses d'une quantité égale à cette longueur.

Pour avoir la vitesse moyenne on divisera les ordonnées des courbes de débit par les surfaces des sections mouillées aux instants correspondants. Il suffit donc de connaître les profils en travers.

Nous avons appliqué ce procédé à la Seine entre Martot et la Risle, pour une marée de vive eau de coefficient 101,

observée en des stations nombreuses le 20 septembre 1880.

La Planche XX montre, à une échelle qui a été très réduite, les courbes de marée, de débit et de vitesse moyenne pour neuf stations de la Seine.

Le débit de la Seine était ce jour-là de 200 mètres cubes.

Le premier flot donne lieu partout au débit le plus considérable, malgré la plus grande élévation du second flot aux stations d'amont. En allant vers l'aval, la couche des débits présente une deuxième protubérance correspondant au second flot, qui se continue jusqu'à la Risle, en diminuant d'importance par rapport à la première.

Le débit de flot dure à peu près cinq heures partout, mais aux stations d'aval, la plus grande partie du volume s'écoule dans les deux heures qui suivent le flot.

Les débits de jusant varient dans des proportions moins considérables et d'une manière plus régulière. C'est une heure et demie ou deux heures après l'étale de flot qu'ils sont maximum aux stations d'amont, ce maximum est moins caractérisé et la vitesse varie peu. Le maximum s'accentue à mesure qu'on descend vers l'aval, et forme à Tancarville et à la Risle une protubérance très accentuée.

Nous avons fait les mêmes opérations sur une marée du 18 août 1856, de même coefficient, et avec même débit de la Seine.

Les ordonnées des courbes de débit sont partout plus faibles ; les formes des courbes d'amont sont peu modifiées, mais celles d'aval présentent des différences marquées. La durée du flot n'est en moyenne que de quatre heures.

Les aires des courbes de flot, relevées au planimètre sur le dessin primitif à grande échelle, donnent le volume total introduit par la marée en amont de chaque station.

La Planche XVIII montre la comparaison de ces volumes en 1880 et 1856. On voit que, bien qu'en 1856 les endiguements de la Seine aient déjà été exécutés jusqu'à Tancarville, les prolongements des digues en aval ont considérablement amélioré les conditions d'introduction.

Si l'on veut se rendre compte à un instant donné de l'état des débits en chaque point, il suffit d'en tracer les courbes instantanées.

La Planche XXI fournit ces courbes pour la marée du 20 septembre 1880. La courbe des débits maxima forme l'enveloppe de toutes ces courbes.

Le procédé indiqué ci-dessus pour obtenir les débits et les vitesses moyennes donne ces éléments à chaque endroit et à tout instant, mais il est laborieux et exige beaucoup de temps.

Cubages expéditifs.

Quand on a à étudier plusieurs marées correspondant à divers états du fleuve, on peut se contenter de déterminer le cube d'eau introduit en amont d'une section quelconque.

On prend alors les profils instantanés correspondant aux étales de flot et de jusant à cette station, et on obtient le cube en faisant la somme algébrique du produit des aires partielles pour les longueurs moyennes correspondantes.

Le calcul de cubature peut être remplacé par un procédé graphique.

Nous ferons une transformée des profils instantanés, en multipliant les ordonnées par la largeur correspondante. La surface comprise entre les deux courbes représente alors

le volume lui-même, et il suffit de relever l'aire au planimètre.

Ayant d'une part la représentation graphique des largeurs, d'autre part les profils instantanés correspondants aux deux étales, on aura immédiatement l'ordonnée de la transformée en se servant d'une règle à calcul graduée sur la tranche. Deux mesurages et leur multiplication sur la règle donnent aussitôt la valeur de l'ordonnée de la transformée.

Il est clair que pour avoir le volume introduit réellement, il faut en déduire le débit d'eau douce pendant le même temps.

Les Planches XXII et XXIII représentent cette détermination graphique pour les marées des 10 et 17 septembre 1885, coefficients 109 et 34, dont les courbes sont déjà données Planche VIII, et pour la marée du 30 mars 1888, coefficient 114, correspondant à une assez forte crue de la Seine.

Le 10 septembre 1855, le débit de la Seine était d'environ 200 mètres cubes, donnant, pour cinq heures, 3 600 000 mètres cubes. L'aire est de 89^{cq},2 et chaque centimètre carré à l'échelle adoptée représente un million de mètres cubes. Le volume introduit a donc été de 85 600 000 mètres cubes.

Pour la morte eau du 17 septembre 1885, le débit d'amont est de 175 mètres cubes. L'aire de la courbe équivaut à 41 200 000 et, après déduction des 3 200 000 mètres cubes débités par la Seine, donne 38 millions.

Le 30 mars 1888, coefficient 114. L'aire ne correspond plus qu'à 77 300 000 mètres cubes. Il n'a pas été fait de jaugeage de la Seine, mais par comparaison on peut prendre de 1600 à 1800 mètres cubes comme débit; il y aurait à

retrancher 28 800 000 mètres cubes ou 32 400 000 mètres cubes.

Le cube introduit serait donc de 45 à 48 millions.

On voit par les exemples ci-dessus que le volume introduit par la marée diffère beaucoup avec le coefficient.

Les crues diminuent le cube introduit dans une forte proportion. La marée de 114 du 30 mars 1888 aurait donné lieu, en basses eaux, à une introduction de 90 millions. Elle se trouve donc réduite de 50 pour 100 environ. Cela tient à ce que si la marée monte davantage en temps de crue dans les stations d'amont, elle baisse moins dans une proportion considérable.

Le coefficient moyen des 706 marées de l'année est égal à 70. Au coefficient correspond une introduction moyenne de 60 millions.

Le volume total introduit par an est donc de 40 à 45 milliards. Le volume annuel moyen débité par la Seine est, comme on a vu, de 15 milliards, le volume total expulsé est donc de 55 à 60 milliards.

Le rapport du volume introduit au volume expulsé est donc de 75 pour 100 en chiffres ronds et le volume introduit représente environ le triple du débit de la Seine.

Mouvement des molécules liquides.

Malgré l'importance des volumes introduits, comme la marée refoule vers l'amont toute l'eau descendante qui se trouve au-dessus du niveau de basse mer au moment de l'arrivée du flot, les molécules liquides ne remontent pas à des distances considérables.

Prenons, par exemple, une marée de coefficient 100 ; le cube introduit en amont de la Risle est de 80 à 85 millions de mètres cubes. Prenons ensuite plusieurs stations situées en amont et évaluons par les procédés déjà indiqués le cube d'eau compris entre ces stations et la Risle au moment de l'étale de flot à ces stations.

Nous verrons que c'est au kilomètre 320, un peu en amont d'Aizier, que ce cube sera égal au cube introduit à la Risle.

Une molécule d'eau partant de la Risle et amenée de la vitesse moyenne du courant, ne parcourrait donc pas vers l'amont plus de 26 kilomètres.

On peut se rendre compte d'ailleurs du mouvement oscillatoire d'une molécule d'eau amenée de la vitesse moyenne du courant par le diagramme de la Planche XXIV.

On a supposé, pour simplifier, une succession de marées toutes égales entre elles, et on a appliqué les vitesses moyennes aux divers moments de marée en chaque endroit, à une molécule partant de Rouen à l'étale de flot. La molécule considérée ne passera au méridien du Havre qu'après douze marées complètes, soit six jours et un quart.

Partant au commencement du jusant, la molécule mettra pour aller au méridien du Havre :

De la Risle	5 heures.	
De Quillebeuf.	15 »	
De Caudebec	36 »	ou 1 jour et demi.
De Duclair.	84 »	ou 3 jours et demi.
De Rouen.	150 »	ou 5 jours un quart.

Ce n'est là qu'un diagramme, car on n'a pas tenu compte des variations de coefficients, mais ce diagramme suffit à

montrer que le mouvement définitif de descente est assez lent.

Les études sur les profils en long, les débits et les vitesses qui ont précédé ont été faites sur toute l'étendue de la Seine maritime, avec un nombre de stations nécessairement assez écartées, en appliquant les largeurs moyennes sur d'assez longues sections, enfin, en supposant la largeur indépendante de la hauteur d'eau.

Les erreurs commises ne sont pas très considérables. Nous avons essayé néanmoins de procéder aux mêmes études avec une exactitude complète.

A cet effet, au lieu de la Seine entière, nous avons pris l'étendue de 21 300 mètres comprise entre les k. 316 et 337,300. Nous avons installé dans cette section 15 échelles d'observations, de sorte que leur distance n'est que de 1000 à 2000 mètres. On a observé en octobre 1888 les marées successives des 20, 22, 24, 26, 27 et 29, dont les coefficients étaient 90, 86, 72, 52, 41 et 37.

Au moyen de ces courbes, on a dressé des profils instantanés à des moments espacés de 10 en 10 minutes seulement.

La transformée de ces profils instantanés a été obtenue de la manière suivante :

Après avoir levé des profils en travers de 500 mètres en 500 mètres, on a calculé au planimètre les sections mouillées correspondant aux diverses hauteurs d'eau.

Portant alors en abscisses les distances, en ordonnées les sections correspondant à chaque station et à chaque cote d'eau des profils instantanés, on a obtenu une série de courbes successives, la surface comprise entre deux courbes représentant la variation du cube d'eau entre les heures

correspondant à ces deux courbes. Les intervalles étant de 10′, en divisant par 600 le volume trouvé, on obtenait la variation de volume par seconde applicable à cet intervalle de 10 minutes.

Cette variation est égale à la somme algébrique des débits aux sections extrêmes.

Nous avons procédé à des jaugeages directs à la station d'amont, ils nous ont donné le débit d'amont.

Le débit à l'aval d'une section est donc égal à la différence algébrique de la variation par seconde entre cette station et la station d'amont et le débit d'amont.

En portant en abscisses, à chaque station, les temps et en ordonnées les débits calculés comme ci-dessus, nous avons établi les courbes de débit à plusieurs stations pour les marées des 22, 24, 27 et 29 octobre.

La Planche XXV montre ces courbes à une échelle très réduite; on n'y a pas figuré les courbes de vitesses moyennes pour ne pas charger la figure.

Les abscisses représentent les temps, les ordonnées représentent, d'une part, les distances, d'autre part, les débits par seconde en plusieurs stations. Les courbes (1) s'appliquent à une marée de coefficient 90, (2) à une de 70, (3) à une de 40, enfin (4) à une de 35. Le débit de flot est compté au-dessus de la ligne d'abscisses correspondant à chaque station, le débit de jusant, au-dessous, de telle sorte que l'intersection de la courbe avec la ligne d'abscisse correspond à une vitesse moyenne nulle.

En vive eau (1) la ligne $A_1 A_1 A_1$.... qui représente la propagation de l'étale de courant coïnciderait avec celle qui représente la propagation de la basse mer dont les diverses heures sont indiquées par les lettres B M. Autrement dit,

les moments de l'arrivée du flot, du renversement de la vitesse moyenne et de la basse mer coïncident en chaque point.

En marée moyenne (2), la ligne $A_2 A_2$.... d'étale de vitesse ne coïncide plus avec la ligne d'étale de hauteur, $B_2 B_2$..., vers Tancarville, la vitesse moyenne se renverse seulement 8 à 10′ environ après le passage du flot. Ce résultat obtenu par le procédé graphique, est d'accord avec les observations directes qui montrent que le courant de jusant persiste quelque temps après le passage du flot, alors que le flot est établi à la surface et surtout sur les bords.

En mortes eaux (3) et (4) l'écart des lignes d'étale de courant $A_3 A_3$.... $A_4 A_4$.... et des lignes d'étale de niveau $B_3 B_3$.... $B_4 B_4$ (ces dernières représentées d'après les observations de marée aussi bien que possible, eu égard à la durée de l'étale de niveau et à l'incertitude de l'heure exacte de basse mer) sont très écartées l'une de l'autre. L'écart va en augmentant de l'amont vers l'aval, il est en moyenne de 1 h. 1/4. Ce résultat est conforme à l'observation. En faibles marées, on constate que la mer monte assez longtemps avant que le courant s'établisse vers l'amont. Les observations du 27 octobre, par exemple (3), ont montré qu'alors que la mer était basse vers 11 h. 50′, un flotteur lâché à 12 h. 20′ dans l'axe du courant a accusé une vitesse de jusant, décroissant de 0 m. 75 à zéro jusqu'à midi 46′, puis une étale de 3′ qui a fini à 12 h. 49′.

Un flotteur, lâché à 70 mètres de la rive gauche à 12 h. 20′, a également accusé jusqu'à 12 h. 35′ une vitesse de jusant suivie d'une étale de 3′, finissant à 12 h. 38′. Sur le bord, l'eau était étale à 12 h. 20′.

Si l'on considère la masse du courant, on peut estimer par moyenne à 12 h. 3/4 l'heure du renversement.

La figure courbe (3) k. 316 donne 12 h. 44′.

Les lignes $A_1 A_1$.... $A_2 A_2$.... $A_3 A_3$.... $A_4 A_4$ sont à peu près parallèles, ce qui veut dire que la vitesse de propagation du renversement du courant est à peu près la même en vive eau et en morte eau.

Nous avons, plus haut, appliqué à la propagation du flot la formule $V = \sqrt{g(H + h)} - U$, et vérifié la concordance du calcul et de l'observation pour la vive eau.

Si pour la morte eau on prend la vitesse de propagation de l'étale de courant comme représentant la vitesse de l'onde, on trouve que la formule s'applique encore. Pour la marée du 29 octobre on avait trouvé 1 h. 5′ par application de la formule, la courbe (4) donne 1 h. 9′.

Proportion d'eau fournie par l'amont et par l'aval pendant que l'étale de courant se transporte d'une station à une autre.

Soient t et t' les heures d'étale de courant à basse mer à deux stations. Pendant l'intervalle $t' - t$, le débit d'aval est toujours positif, celui d'amont toujours négatif, et ces débits concourent à produire la variation du volume d'eau dans la section.

Le cube total d'amont et d'aval est égal à l'aire comprise entre les courbes correspondant aux heures t et t' sur les transformées des profils instantanés.

Nous les avons obtenues au moyen du planimètre.

MARÉE.	COEFFICIENT.	CUBE INTRODUIT EN MILLIONS DE MÈTRES CUBES		TOTAL OU VARIATION DU VOLUME DE LA SECTION.	PROPORTION DU TOTAL VENANT DE		RAPPORT DU CUBE VENANT D'AVAL A CELUI VENANT D'AMONT.
		PAR L'AVAL.	PAR L'AMONT.		L'AVAL.	L'AMONT.	
(1)	90	24	6	30	0,8	0,2	4
(2)	70	20	6	26	0,77	0,23	3,3
(3)	40	8	4	12	0,67	0,33	2
(4)	35	4,5	3	7,5	0,6	0,4	1,5

Les débits de jusant à la même heure croissent légèrement quand on va de l'amont vers l'aval. Cela tient au dé placement vers l'aval pendant le temps $t' - t$, de l'eau de la section sans que cette eau sorte de la section. Quand il est flot aux stations d'aval, les molécules d'eau qui ont déjà traversé la station d'amont continuent à descendre jusqu'à ce que le flot les atteigne, l'eau continue à baisser à l'amont et ces molécules viennent engraisser le flot.

Les résultats ci-dessus sont aussi exacts que possible, mais exigent des calculs ou des opérations extrêmement longues. Dans la plupart des cas, le procédé expéditif dont nous avons parlé d'abord est bien suffisant pour comparer entre elles diverses marées ou diverses périodes.

Régime des fonds.

Estuaire. — On ne trouve, dans l'estuaire des affleurements de terrains anciens que près des bords et aux bancs

fixes d'Amfard et du Ratier. Ailleurs, ces terrains sont recouverts de produits contemporains consistant en sables siliceux mélangés de débris calcaires, et plus ou moins vaseux.

La provenance de ces matières n'est bien caractérisée le long de la côte Sud que jusque Criquebeuf; le long de la côte Nord, que jusqu'au Hoc. Elles sont fournies par la désagrégation des côtes. Dans tout le reste de l'estuaire on ne trouve plus qu'un mélange résultant de l'action alternative des courants.

L'épaisseur des produits contemporains est souvent considérable. Nous avons construit en 1883, pour reconnaître cette épaisseur, un appareil de forage composé de tubes se vissant au moyen de manchons intérieurs, et dans lesquels on amenait de l'eau comprimée à la pompe par un tuyau flexible raccordé au sommet. L'eau sortait par un ajutage à l'autre bout. Le tube s'enfonçait rapidement sous l'influence du courant d'eau, à condition qu'on l'agite d'un mouvement de sonnette pour empêcher le tassement du sable. Quand il s'arrêtait, c'est qu'il atteignait une couche inaffouillable ou peu affouillable.

On prélevait alors un échantillon en faisant faire deux ou trois tours au tube, à l'aide d'une clef à ruban, l'ajutage étant garni d'une sorte de tarière qui permettait de ramener l'échantillon à la surface.

En des points nombreux, on est arrivé à bout de tubes jusqu'à 10 mètres au-dessous du zéro des cartes sans être arrêté. Ailleurs, on était arrêté par des couches argileuses assez profondes ne paraissant pas anciennes et ayant le même aspect que les dépôts contemporains dans les parties abritées.

Les bancs se déplacent constamment sous l'action des courants alternatifs, et le chenal se fraye entre eux une route changeante, plus ou moins sinueuse, large ou profonde.

La configuration des fonds a été relevée dans des reconnaissances des ingénieurs hydrographes en 1834 — 1855 — 1866 — 1869 — 1875 et 1880. Comme à cause des changements rapides, ces relevés aussi espacés ne donnaient qu'un aperçu trop superficiel du régime des fonds, notre service a effectué des relevés complets en 1882 — 1883 et 1884.

Depuis nous avons préféré faire des relevés partiels, mais au nombre de deux ou trois par an.

Nos relevés sont faits par les procédés usuels, auxquels il serait trop long de s'arrêter pour en exposer les détails.

Toutes ces cartes hydrographiques, en les comparant entre elles, permettent de suivre les mouvements du fond. Elles nous ont servi aussi à faire des cubages par petites zones indiquant les mouvements en quantité. Nous n'entrerons pas dans la discussion fort longue de ces résultats. Il nous suffira de dire que, dans l'estuaire, le fond est essentiellement mobile, garni de matières affouillables sur une grande hauteur, et formé de bancs presque toujours en mouvement.

Partie comprise entre Rouen et la Risle. — Jusqu'à présent, dans cette partie, l'étude de la nature du fond et de ses variations n'est pas encore complète, certains hauts-fonds, vers l'amont, sont formés de gravier calcaire, de marne ou d'argile. On trouve de la roche de même nature que celle des coteaux crayeux qui bordent le fleuve dans plusieurs parties profondes.

Les seuils du Trait et des Meules, aux environs de la Mailleraye, sont formés de tourbes. En aval de ce point, on trouve souvent dans le fond des sables.

Il est nécessaire de compléter nos connaissances sur ce point et un programme est préparé à cet effet. Ce programme comprend des dragages d'essais, permettant de prélever des échantillons de fort volume, ainsi que des reconnaissances à la cloche à plongeur et au scaphandre, permettant de reconnaître rapidement la nature de la surface du fond.

Les variations du fond n'ont guère, jusqu'à présent, fait l'objet de reconnaissances qu'aux environs des seuils, dans l'intérêt de la navigation, ou encore aux abords des points où s'exécutaient des travaux. Ces relevés, faits à époque irrégulière et sans lien entre eux, étaient insuffisants pour avoir une idée générale des variations du fond, et des répercussions des variations d'une partie sur les autres parties. Aussi une décision ministérielle de 1888 a créé un service spécial hydrographique de la Seine.

Organisé sur les mêmes bases que celui qui fonctionne depuis assez longtemps sur la Gironde, on sonde suivant des profils en travers, toujours aux mêmes endroits, indiqués au besoin par des bornes, et les sondes, réduites au moyen des observations de hauteur d'eau, servent à donner les cotes du fond. Ces cotes sont rapportées sur des plans autographiés à l'échelle de $\frac{1}{10000}$; on trace les courbes de niveau et on met les teintes. La collection de ces plans successifs, que l'on comparera entre eux, permettra d'étudier le régime des fonds sur chaque point et dans leur ensemble.

Au point de vue du fond, la Seine entre Rouen et la Risle

peut se caractériser ainsi. Dans les parties d'amont, le lit n'est pas mobile, les fonds sont peu affouillables et varient peu. Dans les parties d'aval, le lit est demi-mobile en général, quelques parties étant très affouillables, d'autres l'étant très peu.

Mouvement des alluvions.

On a constaté depuis longtemps que les eaux amenées par le flot dans la Seine sont très chargées. La rapidité avec laquelle se sont créées à l'abri des endiguements de vastes prairies d'alluvion en fait foi. Ces alluvions sont d'origine marine et non fluviale. Les quantités de matières en suspension diffèrent beaucoup suivant le coefficient et l'heure de la marée en chaque point.

Nous avons fait en 1882 des expériences nombreuses pour déterminer la quantité des matières en suspension dans l'eau.

Ces expériences ont comporté d'abord d'heure en heure, à chaque station, des prises d'échantillons à 1 mètre au-dessous de la surface et à 1 mètre au-dessus du fond, avec observation de la hauteur de l'eau et de la vitesse du courant; ensuite, l'analyse des échantillons ainsi obtenus, au point de vue de la quantité et de la composition des matières; enfin la représentation des résultats.

Les échantillons étant de plus de mille, il fallait recourir à un procédé expéditif d'analyse.

La quantité de sédiment a été évaluée par la hauteur du dépôt susceptible de se former après un certain temps de repos, et comme le volume du dépôt est faible par rapport à celui de l'échantillon, il fallait adopter un procédé

multiplicateur rendant les lectures plus exactes et plus faciles.

Les échantillons, préalablement agités et mesurés dans une éprouvette graduée, étaient versés dans des sortes d'entonnoirs dont le col était gradué en divisions d'égal volume (dixièmes de centimètre cube). Un bouchon en caoutchouc, enfoncé jusqu'au zéro de la graduation, permettait de vider et nettoyer l'appareil.

Après un repos de vingt-quatre heures on lisait la hauteur, et par suite le volume du dépôt, et le volume de l'échantillon étant connu, on obtenait le dépôt en centimètres cubes par litre après vingt-quatre heures.

Des expériences préalables avaient fait voir qu'après vingt-quatre heures, le dépôt est complètement effectué, que le tassement dans l'eau continue encore quelque temps après, et atteint environ un dixième de la valeur primitive pour les vases. Pour le sable pur, ce tassement est nul.

Le poids des sédiments s'obtient en en pesant quelques-uns. Il varie avec la nature du sédiment, et la moyenne de nos essais est indiquée au tableau suivant.

NATURE DE L'ÉCHANTILLON.	POIDS D'UN CENTIMÈTRE CUBE DE DÉPOT APRÈS 24 HEURES.
	Grammes.
Vase très ténue.	0,190
Vase dense.	0,545
Sable et vase.	0,762
Sable pur.	1,442

Le sable à grains ne se trouve que rarement dans les

échantillons recueillis, et on peut leur appliquer, en chiffres ronds, 0 m. 90 comme coefficient de tassement, et 0 gr. 500 comme poids du centimètre cube.

L'analyse chimique nous a donné la composition moyenne suivante :

Sable siliceux	3,00
Insoluble dans les acides	54,80
Fer et alumine	3,85
Chaux	18,60
Magnésie	0,60
Perte au feu	19,15
	100,00

Les résultats des expériences ont été rapportés sous forme graphique, sur des cartes figurant les emplacements des postes d'observation.

Nous donnons, Planche XXVI, un spécimen de nos graphiques.

On obtiendra le débit en matières solides, à l'aide de ces graphiques, de la manière suivante :

Soient

H la hauteur d'eau ;
D et D′ les dépôts du fond et de la surface ;
V la vitesse de surface ;
m le coefficient de vitesse moyenne.

Le débit en matières solides, sur une largeur L, sera égal à

$$1000 \frac{D + D'}{2} m \text{ V.H.L.}$$

et le poids débité sera environ de la moitié de ce chiffre (0 gr. 500 par centimètre cube).

Les graphiques des dépôts établissent ou vérifient les faits suivants :

A l'entrée de l'estuaire, les eaux de flot sont claires, celles de jusant peu chargées. Elles sont troubles le long de la côte du Calvados. Dans le milieu de l'estuaire, les sédiments sont en proportion considérable, et cette proportion diminue quand on se rapproche des digues. A Quillebeuf elle est plus faible, et à Duclair elle devient insignifiante.

Les eaux sont toujours plus chargées en vives eaux qu'en mortes eaux, le maximum de trouble suivant en général de quelque temps le maximum des vitesses, et le minimum s'observant à la fin des courants de même sens et aux étales.

Au fond le trouble est plus grand qu'à la surface, sauf dans quelques échantillons pris dans les tourbillons des forts courants.

En vives eaux, le débit des matières est plus fort au flot qu'au jusant. Le contraire a lieu en mortes eaux.

Pour donner un aperçu graphique de ces résultats sans fournir un nombre considérable de tableaux, on a donné, Planche XXVII, le schéma de la quantité moyenne dans une marée de matières en suspension aux diverses stations du fleuve.

Salure des eaux.

Nous possédions quelques observations sur la salure des eaux, mais ces renseignements étaient isolés et incomplets, et nous avons profité des nombreux échantillons recueillis pour l'étude des sédiments pour faire une série complète d'observations sur la salure.

Nous avons employé, pour doser rapidement le sel marin,

une liqueur titrée de nitrate d'argent virant au rouge l'échantillon coloré en jaune par le bichromate de potasse dès que le chlore est saturé.

Les résultats ont été rapportés pour chaque poste d'observation et chaque marée complète, de manière à figurer la courbe des richesses en chlore à 1 mètre au-dessous de la surface et à 1 mètre au-dessus du fond. La Planche XXVIII donne un spécimen de ces graphiques pour la marée de morte eau, coefficient 40, du 6 septembre 1882, entre le Havre et le banc d'Amfard. La Planche XXX figure à une échelle réduite les courbes de salure en diverses stations pour une marée de vive eau et une marée de morte eau. Les ordonnées de ces courbes sont égales à la moyenne des salures au fond et à la surface.

L'ensemble de ces graphiques montre que la salure est généralement plus forte au fond qu'à la surface et qu'elle décroît assez rapidement quand on va vers l'amont. En vives eaux la salure n'atteint pas Villequier, en mortes eaux elle n'arrive qu'à Quillebeuf à l'étale de flot. A l'étale de jusant on ne trouve pas de sel en amont de la Risle.

La Planche XXIX figure le schéma des salures maxima et minima aux diverses stations de la Seine, les ordonnées des courbes étant égales à la demi-somme des salures à la surface et au fond.

Conclusion.

La connaissance exacte des faits, base de toute science et de toute application utile, est d'autant plus importante et, en même temps, d'autant plus difficile à acquérir, que ces faits sont plus nombreux et plus complexes et que, par

leur grandeur même, comme il arrive dans les fleuves à marée, les phénomènes, échappant à toute expérimentation artificielle, ne laissent d'autre moyen d'étude que l'observation directe et successive des faits naturels.

Cette observation exige beaucoup d'efforts, de temps et de dépenses; on n'arrive pas d'ailleurs du premier coup à discerner, dans la masse de ces faits, quels sont ceux auxquels il convient de s'attacher d'abord et comment il faut ensuite les grouper et les représenter afin que l'esprit puisse en trouver les rapports et s'en servir pour donner aux observations subséquentes une direction de plus en plus utile.

Nous nous sommes proposé ici, en nous bornant à l'étude des faits et en nous abstrayant systématiquement d'en tirer aucune conséquence de doctrine, de donner, sous une forme abrégée, le résumé de ce qui a été tenté depuis dix ans, pour observer, grouper et représenter les phénomènes de la Seine maritime.

C'est dire que notre travail ne peut comporter d'autre conclusion que la nécessité de poursuivre, tant sur la Seine que sur les autres fleuves, les mêmes études pour l'avancement d'une science encore à ses débuts.

19101. — Imprimerie A. Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.


3 0112 077866355